Par Max Tegmark

Univers parallèles[1]

Pas seulement un élément incontournable de la science-fiction, les autres univers sont une implication directe des observations cosmologiques

Existe-t-il une copie de vous-même en train de lire cet article ? Une personne qui n'est pas vous, mais qui vit sur une planète appelée Terre, avec ses montagnes brumeuses, ses champs fertiles et ses villes tentaculaires, dans un système solaire comptant huit autres planètes ? La vie de cette personne a été en tous points identique à la vôtre. Mais peut-être décide-t-elle maintenant d'interrompre sa lecture, tandis que vous, vous poursuivez votre lecture.

L'idée d'un tel alter ego paraît étrange et improbable, mais il semble que nous devions nous y faire, car elle est étayée par des observations astronomiques. Le modèle cosmologique le plus simple et le plus répandu aujourd'hui prédit l'existence d'un jumeau dans une galaxie située à environ $10^{10^{28}}$ mètres de la nôtre. Cette distance est si grande qu'elle dépasse l'entendement astronomique, mais cela ne rend pas votre double moins réel. Cette estimation repose sur des probabilités élémentaires et ne fait même pas appel à la physique moderne spéculative ; elle suppose simplement que l'espace est infini (ou du moins suffisamment vaste) et presque uniformément rempli de matière, comme le montrent les observations. Dans l'espace infini, même les événements les plus improbables doivent se produire quelque part. Il existe une infinité d'autres planètes habitées, dont non pas une seule, mais une infinité, abritant des personnes ayant la même apparence, le même nom et les mêmes souvenirs que vous, et qui incarnent toutes les variations possibles de vos choix de vie.

Vous ne verrez probablement jamais vos autres moi. La distance maximale que vous pourrez observer correspond à celle parcourue par la lumière au cours des 14 milliards d'années écoulées depuis le début de l'expansion du Big Bang. Les objets visibles les plus éloignés se situent actuellement à environ 4×10^{26} mètres, une distance qui définit notre univers observable, également appelé volume de Hubble, volume de l'horizon ou simplement univers. De même, les univers de vos autres moi sont des sphères de même taille, centrées sur leurs planètes respectives. Ils constituent l'exemple le plus simple d'univers parallèles. Chaque univers n'est qu'une infime partie d'un multivers plus vaste.

Selon cette définition même de l'« univers », on pourrait s'attendre à ce que la notion de multivers relève éternellement du domaine de la métaphysique. Pourtant, la frontière entre physique et métaphysique est définie par la vérifiabilité expérimentale d'une théorie, et non par son étrangeté ou l'existence d'entités inobservables. Les

---

[1] Tegmark, M. (2003). Parallel Universes. *Scientific American*, 288(5), 40-51. https://stanford.edu/~oas/SI/QM/papers/SAMultiverse603.pdf

frontières de la physique se sont progressivement étendues pour intégrer des concepts toujours plus abstraits (et autrefois métaphysiques), tels que la rotondité de la Terre, les champs électromagnétiques invisibles, le ralentissement du temps à haute vitesse, la superposition quantique, la courbure de l'espace et les trous noirs. Ces dernières années, le concept de multivers est venu s'ajouter à cette liste. Il repose sur des théories éprouvées comme la relativité et la mécanique quantique, et il remplit les deux critères fondamentaux d'une science empirique : il permet de faire des prédictions et il est réfutable. Les scientifiques ont envisagé jusqu'à quatre types distincts d'univers parallèles. La question essentielle n'est pas de savoir si le multivers existe, mais plutôt combien de niveaux il comporte.

Niveau I : Au-delà de notre horizon cosmique

Les univers parallèles de vos alter ego constituent le multivers de niveau I. C'est le type le moins controversé. Nous acceptons tous l'existence de choses invisibles à l'œil nu, mais que nous pourrions observer en changeant de point de vue ou simplement en patientant, à l'instar de ceux qui guettent l'apparition de navires à l'horizon. Les objets situés au-delà de l'horizon cosmique ont un statut similaire. L'univers observable s'étend d'une année-lumière chaque année, la lumière provenant de plus en plus lointaines ayant le temps de nous parvenir. Une infinité s'étend là-bas, attendant d'être découverte. Vous mourrez probablement bien avant que vos alter ego ne se manifestent, mais en principe, et si l'expansion cosmique le permet, vos descendants pourraient les observer grâce à un télescope suffisamment puissant.

L'idée d'un multivers de niveau I semble, à première vue, d'une évidence triviale. Comment l'espace pourrait-il ne pas être infini ? Existe-t-il un panneau indiquant « L'espace s'arrête ici » ? Si oui, qu'y a-t-il au-delà ? En réalité, la théorie de la relativité générale d'Einstein remet en question cette intuition. L'espace pourrait être fini s'il présente une courbure convexe ou une topologie inhabituelle (c'est-à-dire une interconnexion particulière). Un univers sphérique, en forme de beignet ou de bretzel aurait un volume limité et serait dépourvu de bords. Le rayonnement de fond cosmologique permet de tester avec précision de tels scénarios [voir "Is Space Finite?" de Jean-Pierre Luminet, Glenn D. Starkman et Jeffrey R. Weeks ; *Scientific American*, avril 1999]. Jusqu'à présent, cependant, les preuves s'y opposent. Les modèles infinis correspondent aux données, et des limites strictes ont été imposées aux alternatives.

Aperçu/ *Multivers*

L'une des nombreuses implications des récentes observations cosmologiques est que le concept d'univers parallèles n'est pas une simple métaphore. L'espace semble être d'une taille infinie. Dès lors, quelque part dans l'espace, tout ce qui est possible devient réel, aussi improbable que cela puisse paraître. Au-delà de la portée de nos télescopes se trouvent d'autres régions de l'espace identiques à la nôtre. Ces régions constituent une forme d'univers parallèle. Les scientifiques peuvent même calculer la distance moyenne qui les sépare. Et cela relève d'une physique relativement solide. Lorsque les cosmologistes envisagent des théories moins bien établies, ils concluent que d'autres univers peuvent avoir des propriétés et des lois physiques entièrement différentes. L'existence de ces univers expliquerait divers aspects étranges du nôtre. Elle pourrait même

répondre à des questions fondamentales sur la nature du temps et la compréhensibilité du monde physique.

Une autre possibilité est que l'espace soit infini, mais que la matière soit confinée à une région finie autour de nous – le modèle historiquement populaire de « l'univers-île ». Dans une variante de ce modèle, la matière se raréfie à grande échelle selon une structure fractale. Dans les deux cas, presque tous les univers du multivers de niveau I seraient vides et inertes. Cependant, des observations récentes de la distribution tridimensionnelle des galaxies et du fond diffus cosmologique ont montré que l'organisation de la matière laisse place à une uniformité terne à grande échelle, sans structures cohérentes supérieures à environ 10^{24} mètres. En supposant que cette tendance se maintienne, l'espace au-delà de notre univers observable regorge de galaxies, d'étoiles et de planètes.

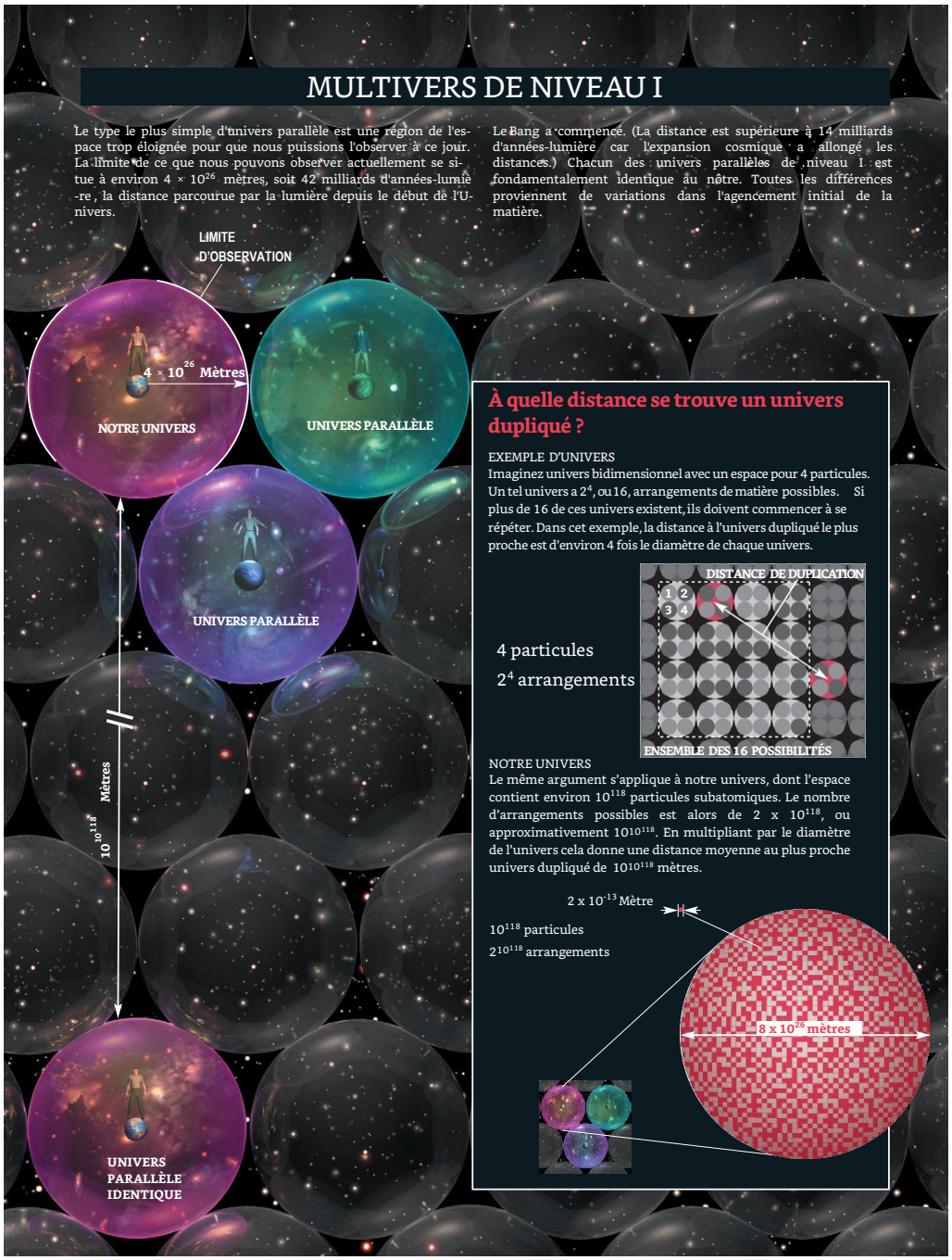
Les observateurs vivant dans des univers parallèles de niveau I subissent les mêmes lois de la physique que nous, mais avec des conditions initiales différentes. Selon les théories actuelles, les processus survenus au tout début du Big Bang ont dispersé la matière de manière aléatoire, générant ainsi toutes les configurations possibles avec une probabilité non nulle. Les cosmologistes supposent que notre univers, avec une distribution de matière quasi uniforme et des fluctuations de densité initiales de l'ordre de 1/100 000, est assez typique (du moins parmi ceux qui abritent des observateurs). Cette hypothèse sous-tend l'estimation selon laquelle notre double le plus proche se situe à $10^{10^{28}}$ mètres. À environ $10^{10^{92}}$ mètres, il devrait exister une sphère de 100 années-lumière de rayon identique à celle centrée sur nous, de sorte que toutes nos perceptions au cours du siècle prochain seront identiques à celles de nos homologues là-bas. À environ $10^{10^{118}}$ mètres se trouverait un volume de Hubble entier, identique au nôtre.

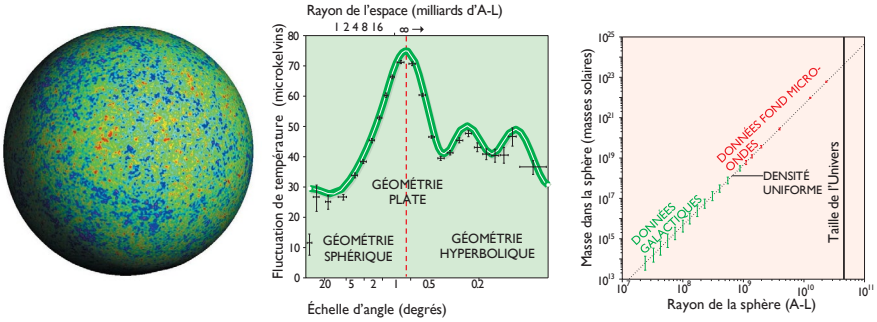
Ce sont des estimations extrêmement prudentes, obtenues simplement en comptant tous les états quantiques possibles qu'un volume de Hubble peut posséder à une température inférieure ou égale à 10^8 kelvins. Une méthode de calcul consiste à se demander combien de protons pourraient être contenus dans un volume de Hubble à cette température. La réponse est 10^{118} protons. Chacune de ces particules peut être présente ou non, ce qui donne $2^{10^{118}}$ arrangements possibles de protons. Une boîte contenant autant de volumes de Hubble épuise toutes les possibilités. En arrondissant, une telle boîte mesure environ $10^{10^{118}}$ mètres de diamètre. Au-delà de cette boîte, les univers — y compris le nôtre — se répètent nécessairement. On pourrait obtenir un résultat similaire en utilisant des estimations thermodynamiques ou de gravitation quantique de l'information totale contenue dans l'univers.

Votre plus proche sosie est probablement bien plus proche que ces chiffres ne le suggèrent, compte tenu des processus de formation planétaire et d'évolution biologique qui augmentent considérablement les probabilités. Les astronomes estiment que le volume de Hubble abrite au moins dix planètes habitables ; certaines pourraient fort bien ressembler à la Terre.

Le cadre du multivers de niveau I est couramment utilisé pour évaluer les théories en cosmologie moderne, bien que cette procédure soit rarement explicitée. Prenons

l'exemple de l'utilisation du fond diffus cosmologique pour exclure une géométrie sphérique finie. Les zones chaudes et froides des cartes du fond diffus cosmologique ont une taille caractéristique qui dépend de la courbure de l'espace, et les zones observées semblent trop petites pour correspondre à une forme sphérique. Or, la rigueur statistique est essentielle. La taille moyenne des zones varie aléatoirement d'un volume de Hubble à l'autre ; il est donc possible que notre univers nous trompe : il pourrait être sphérique, mais présenter des zones anormalement petites. Lorsque les cosmologistes affirment avoir exclu le modèle sphérique avec un niveau de confiance de 99,9 %, ils veulent dire que si ce modèle était vrai, moins d'un volume de Hubble sur 1 000 présenterait des zones aussi petites que celles que nous observons.





Les données cosmologiques confirment l'idée que l'espace s'étend au-delà des limites de notre univers observable. Le satellite WMAP a récemment mesuré les fluctuations du fond diffus cosmologique (*à gauche*). Les fluctuations les plus importantes s'étendent sur un peu plus d'un demi-degré, ce qui indique, après application des règles de la géométrie, que l'espace est très vaste, voire infini (*au centre*). (Attention : certains cosmologistes pensent que le point aberrant à gauche du graphique pourrait être la preuve d'un volume fini.) De plus, WMAP et le relevé de décalage vers le rouge des galaxies 2dF ont montré que l'espace à grande échelle est uniformément rempli de matière (*à droite*), ce qui signifie que d'autres univers devraient être fondamentalement semblables au nôtre.

La leçon à retenir est que la théorie du multivers peut être testée et réfutée même si nous ne pouvons pas observer les autres univers. L'enjeu principal est de prédire la composition de l'ensemble des univers parallèles et de définir une distribution de probabilité, ou ce que les mathématiciens appellent une « mesure », sur cet ensemble. Notre univers devrait figurer parmi les plus probables. Dans le cas contraire – si, selon la théorie du multivers, nous vivons dans un univers improbable – alors la théorie est remise en question. Comme je l'expliquerai plus loin, ce problème de la mesure peut s'avérer particulièrement complexe.

Niveau II : Autres bulles post-inflationnistes

Si le concept de multivers de niveau I vous paraît difficile à appréhender, imaginez un ensemble infini de multivers de niveau I distincts, certains présentant peut-être des dimensions spatio-temporelles et des constantes physiques différentes. Ces autres multivers — qui constituent un multivers de niveau II — sont prédits par la théorie actuellement en vogue de l'inflation éternelle chaotique.

L'inflation est une extension de la théorie du Big Bang et résout de nombreuses questions restées sans réponse, notamment pourquoi l'univers est si vaste, si uniforme et si plat. Un étirement rapide de l'espace il y a très longtemps peut expliquer toutes ces propriétés et bien d'autres encore d'un seul coup [voir "The Inflationary Universe", par Alan H. Guth et Paul J. Steinhard ; *Scientific American*, mai 1984 ; et "The Self-Reproducing Inflationary Universe", par Andrei Linde, novembre 1994]. Un tel étirement est prédit par une vaste classe de théories des particules élémentaires, et toutes les preuves disponibles le confirment. L'expression « éternel chaotique » fait référence à ce qui se passe aux très grandes échelles. L'espace dans son ensemble s'étire et continuera de le faire indéfiniment, mais certaines régions cessent de s'étirer et forment des bulles distinctes, comme des poches de gaz dans une miche de pain qui lève. Une infinité de ces bulles émergent. Chacune est un multivers de

niveau I embryonnaire : de taille infinie et rempli de matière déposée par le champ d'énergie qui a entraîné l'inflation.

Ces bulles sont plus qu'infiniment éloignées de la Terre, en ce sens que vous n'y parviendriez jamais, même si vous voyagiez à la vitesse de la lumière pour l'éternité. La raison en est que l'espace entre notre bulle et ses voisines s'étend plus vite que vous ne pourriez le traverser. Vos descendants ne verront jamais leurs doubles ailleurs dans le niveau II. Pour la même raison, si l'expansion cosmique est en accélération, comme les observations le suggèrent aujourd'hui, ils pourraient ne pas voir leurs alter ego même dans le niveau I.

Le multivers de niveau II est bien plus diversifié que le multivers de niveau I. Les bulles varient non seulement dans leurs conditions initiales, mais aussi dans des aspects apparemment immuables de la nature. Le point de vue en physique aujourd'hui est que la dimensionnalité de l'espace-temps, les qualités des particules élémentaires et bon nombre des soi-disant constantes physiques ne sont pas inscrites dans les lois physiques, mais résultent de processus appelés brisure de symétrie. Par exemple, les théoriciens pense que l' espace dans notre univers avait autrefois neuf dimensions, toutes sur un pied d'égalité. Au début de l'histoire cosmique, trois d'entre elles ont participé à l'expansion cosmique et sont devenues les trois dimensions que nous observons maintenant. Les six autres sont maintenant… inobservables, soit parce que elles sont restées microscopiques avec une forme de beignet topologique ou parce que toute matière est confinée à une surface tridimensionnelle (une membrane, ou simplement « brane ») dans les neuf dimensions espace.

Ainsi, la symétrie originelle entre les dimensions s'est brisée. Les fluctuations quantiques qui entraînent l'inflation chaotique pourraient provoquer des brisures de symétrie différentes dans différentes bulles. Certaines pourraient devenir quadridimensionnelles, d'autres ne contenir que deux générations de quarks au lieu de trois, et d'autres encore pourraient avoir une constante cosmologique plus élevée que celle de notre univers.

Une autre façon de produire un multivers de niveau II pourrait être un cycle de naissance et de destruction d'univers. Dans un contexte scientifique, cette idée a été introduite par le physicien Richard C. Tolman dans les années 1930 et récemment développée par Paul J. Steinhardt de l'Université de Princeton et Neil Turok de l'Université de Cambridge. La proposition de Steinhardt et Turok, ainsi que les modèles apparentés, impliquent une seconde brane tridimensionnelle, littéralement parallèle à la nôtre, simplement décalée dans une dimension supérieure [voir "Been There, Done That", de George Musser ; Revue de presse, *Scientific American*, mars 2002]. Cet univers parallèle n'est pas véritablement un univers séparé, car il interagit avec le nôtre. Mais l'ensemble des univers — passés, présents et futurs — que ces branes créent formerait un multivers, dont la diversité serait sans doute comparable à celle produite par l'inflation chaotique. Une idée proposée par le physicien Lee Smolin de l'Institut Périmeter de Waterloo, en Ontario, implique un autre multivers comparable en diversité à celui du niveau II, mais mutant et faisant germer de nouveaux univers à travers des trous noirs plutôt qu'à travers la physique des branes.

Bien que nous ne puissions interagir avec d'autres univers parallèles de niveau II, les cosmologistes peuvent inférer leur présence indirectement, car leur existence peut expliquer des coïncidences inexpliquées dans notre univers. Prenons un exemple : vous arrivez dans un hôtel, on vous attribue la chambre 1967 et vous remarquez que c'est votre année de naissance. Quelle coïncidence ! vous dites-vous. Après un instant de réflexion, vous concluez que ce n'est finalement pas si surprenant. L'hôtel compte des centaines de chambres, et vous n'auriez pas eu cette pensée si on vous avait attribué une chambre dont le numéro ne vous disait rien. La leçon à retenir est que même sans rien connaître aux hôtels, vous pourriez inférer l'existence d'autres chambres d'hôtel pour expliquer cette coïncidence.

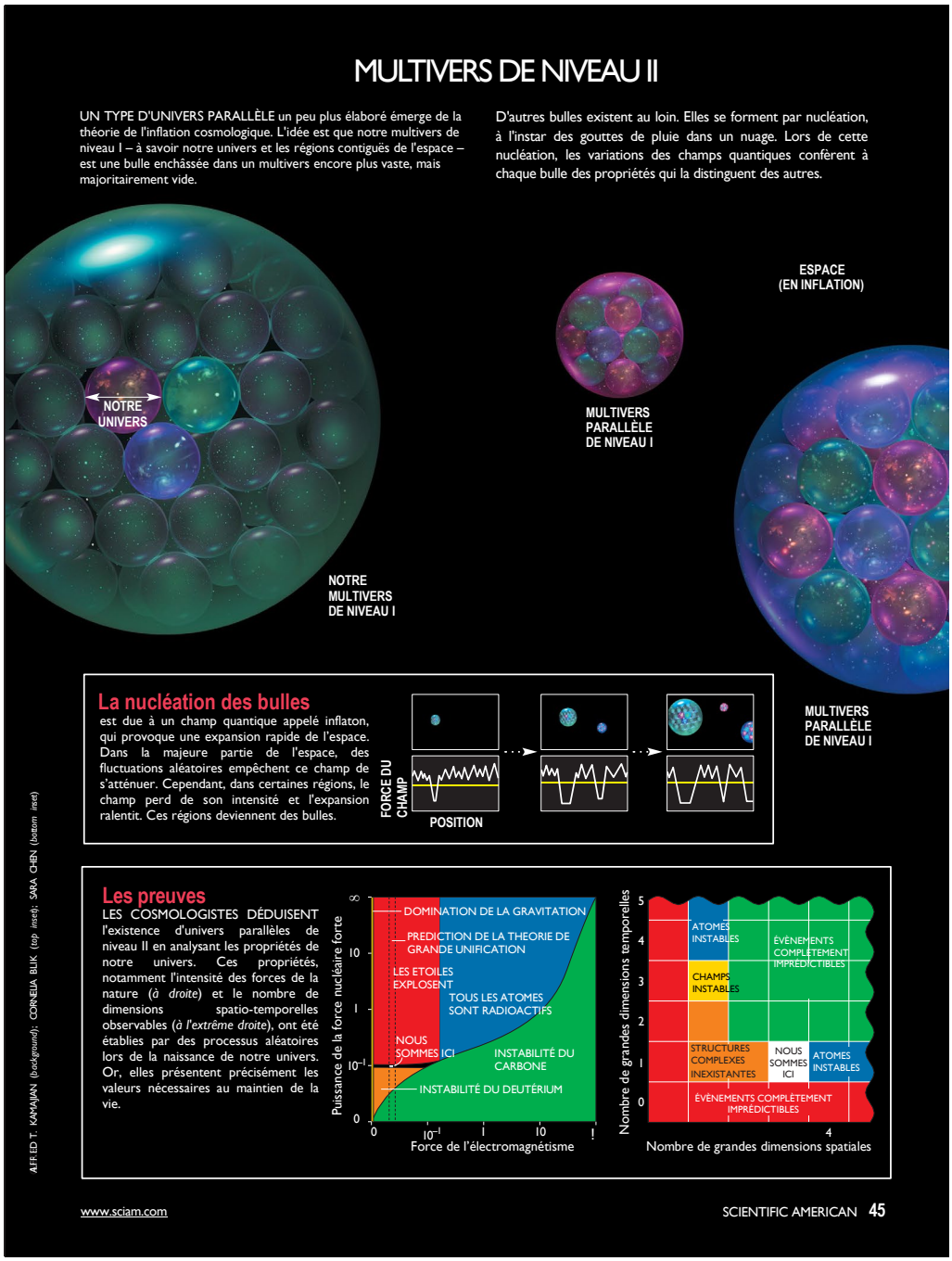
Prenons l'exemple plus pertinent de la masse du Soleil. La masse d'une étoile détermine sa luminosité et, grâce aux principes fondamentaux de la physique, on peut calculer que la vie telle que nous la connaissons sur Terre n'est possible que si la masse du Soleil se situe dans l'intervalle étroit compris entre 1,6 et $2,4 \times 10^{30}$ kilogrammes. Autrement, le climat terrestre pourrait être plus froid que celui de Mars aujourd'hui ou plus chaud que celui de Vénus aujourd'hui. La masse solaire mesurée est de $2,0 \times 10^{30}$ kilogrammes. À première vue, cette apparente coïncidence entre les valeurs de masse habitable et observée semble relever du pur hasard. Les masses stellaires varient de 10^{29} à 10^{32} kilogrammes ; par conséquent, si le Soleil a acquis sa masse de manière aléatoire, la probabilité qu'elle se situe dans la plage habitable est infime. Mais, tout comme dans l'exemple de l'hôtel, on peut expliquer cette apparente coïncidence en postulant l'existence d'un ensemble (ici, plusieurs systèmes planétaires) et d'un effet de sélection (le fait que nous nous trouvions nécessairement sur une planète habitable). Ces effets de sélection liés à l'observateur sont dits « anthropiques », et bien que ce terme soit souvent source de controverses, les physiciens s'accordent généralement à dire que ces effets de sélection ne peuvent être négligés lors de la vérification des théories fondamentales.

Ce qui vaut pour les chambres d'hôtel et les systèmes planétaires vaut aussi pour les univers parallèles. La plupart, sinon la totalité, des attributs induits par la brisure de symétrie semblent être finement ajustés. Une modification même minime de leurs valeurs aurait engendré un univers qualitativement différent, un univers dans lequel nous n'existerions probablement pas.

Si les protons étaient 0,2 % plus lourds, ils pourraient se désintégrer en neutrons, déstabilisant ainsi les atomes. Si l'interaction électromagnétique était 4 % plus faible, il n'y aurait ni hydrogène ni étoiles normales. Si l'interaction faible était beaucoup plus faible, l'hydrogène n'existerait pas ; si elle était beaucoup plus forte, les supernovæ ne parviendraient pas à enrichir l'espace interstellaire en éléments lourds. Si la constante cosmologique était beaucoup plus élevée, l'univers se serait désintégré avant même que les galaxies puissent se former.

Bien que le degré de précision de l'ajustement soit encore débattu, ces exemples suggèrent l'existence d'univers parallèles avec d'autres valeurs des constantes physiques [voir "Exploring Our Universe and Others", de Martin Rees ; *Scientific American*, décembre 1999]. La théorie du multivers de niveau II prédit que les physiciens ne pourront jamais déterminer les valeurs de ces constantes à partir des

principes fondamentaux. Ils se contenteront de calculer des distributions de probabilité pour ce qu'ils devraient trouver, en tenant compte des effets de sélection. Le résultat devrait être aussi générique que compatible avec notre existence.



Niveau III : Mondes multiples quantiques

Les multivers de niveau I et II impliquent des mondes parallèles très éloignés, situés même au-delà du domaine des astronomes. Mais le niveau suivant de multivers est tout près de vous. Il découle de la célèbre, et très controversée, interprétation des mondes multiples de la mécanique quantique : l'idée que des processus quantiques aléatoires provoquent la ramification de l'univers en de multiples copies, une pour chaque résultat possible.

Au début du XXe siècle, la théorie de la mécanique quantique a révolutionné la physique en expliquant le monde atomique, qui ne se soumet pas aux lois classiques de la mécanique newtonienne. Malgré les succès incontestables de cette théorie, un débat passionné persiste quant à sa véritable signification. La théorie décrit l'état de l'univers non pas en termes classiques, tels que les positions et les vitesses de toutes les particules, mais à l'aide d'un objet mathématique appelé fonction d'onde. Selon l'équation de Schrödinger, cet état évolue au cours du temps d'une manière que les mathématiciens qualifient d'« unitaire », ce qui signifie que la fonction d'onde se déplace dans un espace abstrait de dimension infinie appelé espace de Hilbert.

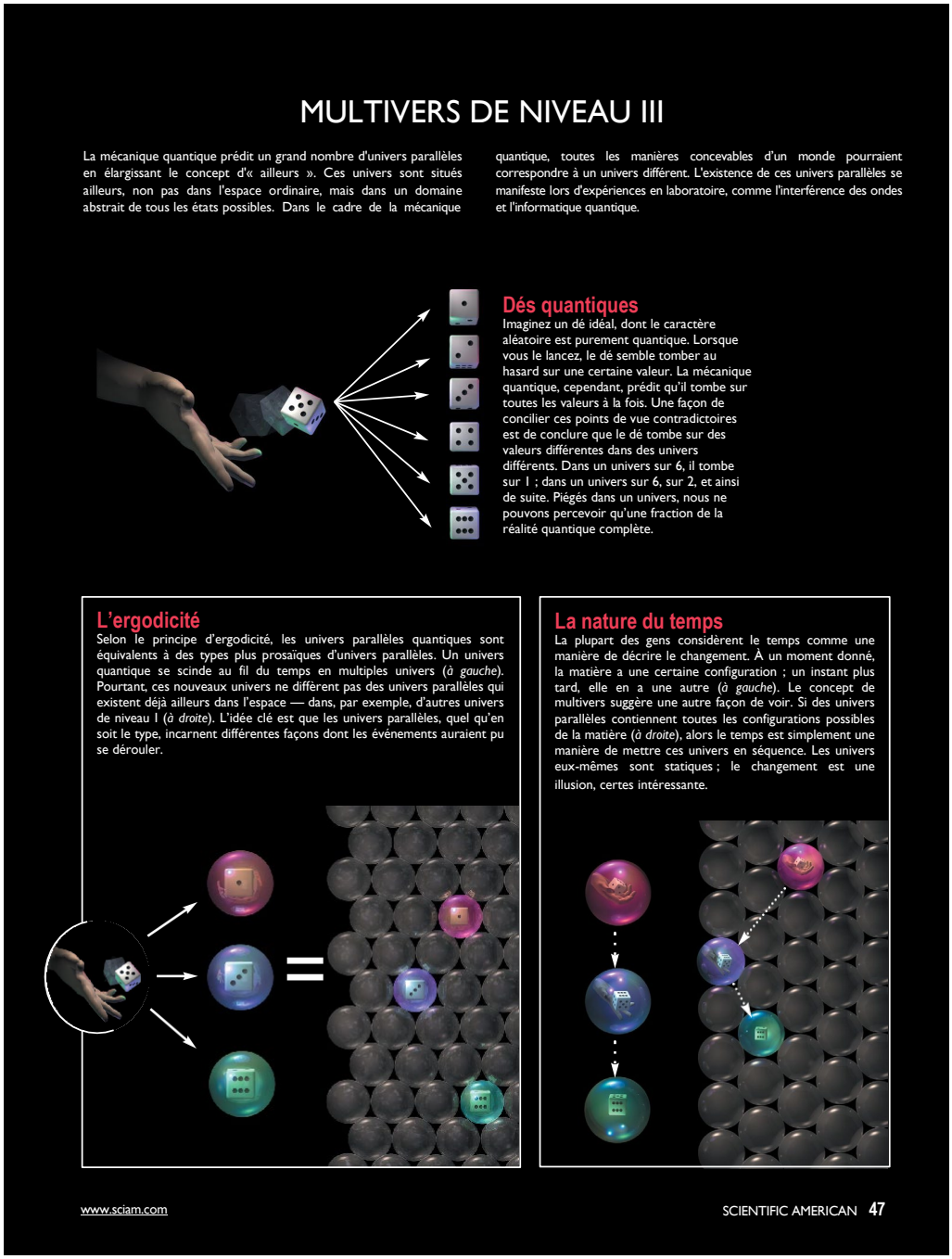
Bien que la mécanique quantique soit souvent décrite comme intrinsèquement aléatoire et incertaine, la fonction d'onde évolue de manière déterministe. Elle n'a rien d'aléatoire ni d'incertain. La difficulté réside dans la manière de relier cette fonction d'onde à nos observations. De nombreuses fonctions d'onde légitimes correspondent à des situations contre-intuitives, comme celle d'un chat à la fois mort et vivant, un phénomène appelé superposition. Dans les années 1920, les physiciens ont expliqué cette étrangeté en postulant que la fonction d'onde « s'effondrait » sur un résultat classique défini à chaque observation. Cet ajout avait le mérite d'expliquer les observations, mais il a transformé une théorie élégante et unitaire en une théorie complexe et non unitaire. L'aléatoire intrinsèque communément attribué à la mécanique quantique résulte de ce postulat.

Au fil des ans, de nombreux physiciens ont abandonné cette conception au profit de celle développée en 1957 par Hugh Everett III, étudiant diplômé de Princeton. Il a démontré que le postulat de l'effondrement est superflu. La théorie quantique pure ne présente, en réalité, aucune contradiction. Bien qu'elle prédise qu'une réalité classique se divise progressivement en superpositions de nombreuses réalités de ce type, les observateurs perçoivent subjectivement cette division comme un léger hasard, dont les probabilités correspondent exactement à celles du postulat de l'effondrement. Cette superposition de mondes classiques constitue le multivers de niveau III.

L'interprétation d'Everett en termes de mondes multiples fascine les esprits, tant dans le domaine de la physique qu'en dehors, depuis plus de quarante ans. Mais cette théorie devient plus facile à appréhender lorsqu'on distingue deux manières d'envisager une théorie physique : le point de vue extérieur du physicien étudiant ses équations mathématiques, tel un oiseau survolant un paysage, et le point de vue intérieur de l'observateur vivant dans le monde décrit par ces équations, tel une grenouille vivant dans le paysage scruté par l'oiseau.

Du point de vue des oiseaux, le multivers de niveau III est simple. Il n'existe qu'une seule fonction d'onde. Elle évolue de manière continue et déterministe au fil du temps, sans aucune division ni parallélisme. Le monde quantique abstrait décrit par cette fonction d'onde évolutive renferme une multitude de scénarios classiques parallèles, se divisant et fusionnant continuellement, ainsi qu'un certain nombre de phénomènes quantiques qui échappent à une description classique. Du point de vue des grenouilles, les observateurs ne perçoivent qu'une infime fraction de cette réalité. Ils peuvent observer leur propre univers de niveau I, mais un processus appelé

décohérence – qui imite l'effondrement de la fonction d'onde tout en préservant l'unitarité – les empêche de voir leurs copies parallèles de niveau III.



Lorsqu'on pose une question à un observateur, qu'il prend une décision rapide et qu'il y répond, des effets quantiques se produisent dans son cerveau, entraînant une superposition de résultats possibles, comme « Continuer à lire l'article » et « Arrêter de lire l'article ». Du point de vue de l'oiseau, le fait de prendre une décision provoque la duplication de l'individu en plusieurs copies : l'une qui continue à lire et l'autre qui s'arrête. Du point de vue de la grenouille, en revanche, chacun de ces alter ego ignore l'existence des autres et perçoit cette ramification comme une simple manifestation d'aléatoire : une certaine probabilité de continuer ou non à lire.

Aussi étrange que cela puisse paraître, la même situation se produit même dans le multivers de niveau I. Vous avez manifestement décidé de poursuivre votre lecture, mais l'un de vos alter ego, dans une galaxie lointaine, a abandonné le magazine après le premier paragraphe. La seule différence entre le niveau I et le niveau III réside dans le lieu de résidence de vos doubles. Au niveau I, ils vivent ailleurs dans le bon vieux espace tridimensionnel. Au niveau III, ils vivent sur une autre branche quantique de l'espace de Hilbert à dimension infinie.

L'AUTEUR

Max Tegmark a créé une version quadridimensionnelle du jeu vidéo Tetris. Dans un autre univers, il serait devenu un développeur de logiciels très bien rémunéré. Dans le nôtre, en revanche, il est devenu professeur de physique et d'astronomie à l'Université de Pennsylvanie. Tegmark est un expert de l'analyse du fond diffus cosmologique et du regroupement des galaxies. Une grande partie de ses travaux porte sur le concept d'univers parallèles : évaluation des preuves de l'existence d'un espace infini et de l'inflation cosmologique ; approfondissement de la compréhension de la décohérence quantique ; et étude de la possibilité que l'amplitude des fluctuations du fond diffus cosmologique, la dimensionnalité de l'espace-temps et les lois fondamentales de la physique puissent varier d'un endroit à l'autre.

L'existence du niveau III repose sur une hypothèse cruciale : l'évolution temporelle de la fonction d'onde est unitaire. Jusqu'à présent, les expérimentateurs n'ont observé aucune déviation de l'unitarité. Au cours des dernières décennies, ils ont confirmé l'unitarité pour des systèmes toujours plus grands, notamment les fullerènes de carbone 60 et les fibres optiques de plusieurs kilomètres de long. Sur le plan théorique, la découverte de la décohérence a renforcé l'hypothèse de l'unitarité [voir "100 Years of Quantum Mysteries", de Max Tegmark et John Archibald Wheeler ; *Scientific American*, février 2001]. Certains théoriciens de la gravité quantique ont remis en question l'unitarité ; l'une de leurs préoccupations est que l'évaporation des trous noirs pourrait détruire l'information, ce qui constituerait un processus non unitaire. Mais une avancée récente en théorie des cordes, connue sous le nom de correspondance AdS/CFT, suggère que même la gravité quantique est unitaire. Dans ce cas, les trous noirs ne détruisent pas l'information, mais la transmettent simplement. [*Note de la rédaction : Un article à paraître examinera cette correspondance plus en détail.*]

Si la physique est unitaire, alors le modèle standard du fonctionnement des fluctuations quantiques au début du Big Bang doit être revu. Ces fluctuations n'ont pas généré de conditions initiales aléatoires. Elles ont plutôt engendré une superposition quantique de toutes les conditions initiales possibles, qui coexistaient simultanément. La décohérence a ensuite induit un comportement classique de ces conditions initiales dans des branches quantiques distinctes. Voici le point crucial : la distribution des résultats sur différentes branches quantiques dans un volume de Hubble donné (niveau III) est identique à la distribution des résultats dans différents volumes de Hubble au sein d'une même branche quantique (niveau I). Cette propriété des fluctuations quantiques est connue en mécanique statistique sous le nom d'ergodicité.

Le même raisonnement s'applique au niveau II. Le processus de brisure de symétrie n'a pas produit un résultat unique, mais plutôt une superposition de tous les résultats, qui ont rapidement divergé. Ainsi, si les constantes physiques, la dimensionnalité de l'espace-temps, etc., peuvent varier entre les branches quantiques parallèles au niveau III, elles varieront également entre les univers parallèles au niveau II.

En d'autres termes, le multivers de niveau III n'apporte rien de nouveau par rapport aux niveaux I et II, seulement des copies supplémentaires et indiscernables des mêmes univers — les mêmes scénarios se répétant inlassablement dans d'autres branches de la physique quantique. Le débat passionné autour de la théorie d'Everett semble donc se conclure sur une note décevante, avec la découverte de multivers moins controversés (niveaux I et II) d'une taille équivalente.

Il va sans dire que les implications sont profondes, et les physiciens commencent à peine à les explorer. Prenons par exemple les conséquences de la réponse à une question fondamentale : le nombre d'univers augmente-t-il exponentiellement avec le temps ? La réponse, surprenante, est non. Du point de vue de l'oiseau, il n'existe bien sûr qu'un seul univers quantique. Du point de vue de la grenouille, ce qui importe, c'est le nombre d'univers discernables à un instant donné, c'est-à-dire le nombre de volumes de Hubble sensiblement différents. Imaginez déplacer des planètes vers de nouveaux emplacements aléatoires, imaginez-vous vous marier avec quelqu'un d'autre, etc. À l'échelle quantique, il existe $10^{10^{118}}$ univers dont la température est inférieure à 10^8 kelvins. C'est un nombre immense, mais fini.

Du point de vue de la grenouille, l'évolution de la fonction d'onde correspond à un glissement perpétuel de l'un de ces $10^{10^{118}}$ états, puis à un autre. Vous vous trouvez actuellement dans l'univers A, celui où vous lisez cette phrase. Vous vous trouvez maintenant dans l'univers B, celui où vous lisez cette autre phrase. Autrement dit, l'univers B possède un observateur identique à celui de l'univers A, à l'exception d'un instant supplémentaire de souvenirs. Tous les états possibles existent à chaque instant, de sorte que le passage du temps pourrait être subjectif — une idée explorée dans le roman de science-fiction de Greg Egan, La cité des permutants (*Permutation City*, 1994), et développée par le physicien David Deutsch de l'Université d'Oxford, le physicien indépendant Julian Barbour, et d'autres. Le cadre du multivers pourrait ainsi s'avérer essentiel à la compréhension de la nature du temps.

Niveau IV : Autres structures mathématiques

LES CONDITIONS INITIALES et les constantes physiques des multivers de niveau I, II et III peuvent varier, mais les lois fondamentales qui régissent la nature demeurent inchangées. Pourquoi s'en arrêter là ? Pourquoi ne pas permettre aux lois elles-mêmes de varier ? Qu'en est-il d'un univers obéissant aux lois de la physique classique, sans effets quantiques ? Qu'en est-il d'un temps s'écoulant par étapes discrètes, comme pour les ordinateurs, au lieu d'être continu ? Qu'en est-il d'un univers qui est simplement un dodécaèdre vide ? Dans le multivers de niveau IV, toutes ces réalités alternatives existent bel et bien.

L'étroite correspondance entre le monde du raisonnement abstrait et celui de la réalité observée laisse penser qu'un tel multivers n'est peut-être pas qu'une simple

spéculation bien arrosée. Les équations et, plus généralement, les structures mathématiques telles que les nombres, les vecteurs et les objets géométriques décrivent le monde avec une remarquable vraisemblance.

Le mystère des probabilités : Quelles sont les chances ?

À MESURE QUE LES THÉORIES DU MULTIVERS gagnent en crédibilité, la question épineuse du calcul des probabilités en physique, autrefois simple désagrément, devient un véritable casse-tête. S'il existe effectivement de nombreuses copies identiques de vous-même, la notion traditionnelle de déterminisme s'effondre. Même en connaissant parfaitement l'état de l'ensemble du multivers, vous ne pourriez pas prédire votre propre avenir, car il vous est impossible de déterminer laquelle de ces copies est vous (chacune se perçoit comme telle). Vous ne pouvez donc prédire que les probabilités de ce que vous observerez. Si un événement a une probabilité de 50 %, par exemple, cela signifie que la moitié des observateurs l'observent. Malheureusement, calculer la proportion d'observateurs parmi une infinité d'autres qui perçoivent chaque événement est une tâche complexe. La réponse dépend de l'ordre dans lequel on les compte. Par analogie, la proportion d'entiers pairs est de 50 % si on les ordonne numériquement (1, 2, 3, 4, …), mais elle tend vers 100 % si on les trie chiffre par chiffre, comme le ferait un traitement de texte (1, 10, 100, 1 000, …). Lorsque les observateurs résident dans des univers déconnectés, il n'existe pas de méthode naturelle évidente pour les ordonner. Il faut donc effectuer un échantillonnage dans les différents univers en leur attribuant des pondérations statistiques, appelées « mesures » par les mathématiciens. Ce problème se manifeste de manière mineure et traitable au niveau I, devient critique au niveau II, a suscité de nombreux débats au niveau III et est catastrophique au niveau IV. Au niveau II, par exemple, Alexander Vilenkin de l'université Tufts et d'autres chercheurs ont publié des prédictions concernant les distributions de probabilité de divers paramètres cosmologiques. Ils ont avancé que les différents univers parallèles, ayant subi des expansions différentes, devraient se voir attribuer des pondérations statistiques proportionnelles à leur volume. D'un autre côté, tout mathématicien vous dira que $2 \times \infty = \infty$, donc, objectivement, un univers infini qui s'est dilaté d'un facteur deux n'est pas devenu plus grand. De plus, un univers fini à la topologie torique est équivalent à un univers parfaitement périodique de volume infini, tant du point de vue mathématique global que du point de vue d'un observateur situé à l'intérieur de cet univers. Alors pourquoi son volume infiniment plus petit lui conférerait-il un poids statistique nul ? Après tout, même dans le multivers de niveau I, les volumes de Hubble commencent à se répéter (quoique de façon aléatoire et non périodique) après environ $10^{10^{118}}$ mètres. Si cela vous paraît problématique, considérez le problème de l'attribution de poids statistiques à différentes structures mathématiques au niveau IV. Le fait que notre univers semble relativement simple a conduit nombre de personnes à suggérer que la mesure appropriée implique d'une manière ou d'une autre la complexité. — *MT*

Dans une célèbre conférence de 1959, le physicien Eugene P. Wigner affirmait que « l'immense utilité des mathématiques dans les sciences naturelles frôle le mystère ». Paradoxalement, les structures mathématiques semblent étrangement concrètes. Elles satisfont à un critère fondamental d'existence objective : elles sont identiques

quel que soit celui qui les étudie. Un théorème est vrai, qu'il soit démontré par un humain, un ordinateur ou un dauphin intelligent. Des civilisations extraterrestres contemplatives découvriraient les mêmes structures mathématiques que nous. C'est pourquoi les mathématiciens disent souvent qu'ils découvrent les structures mathématiques plutôt qu'ils ne les créent.

Il existe deux paradigmes plausibles mais diamétralement opposés pour comprendre la correspondance entre les mathématiques et la physique, une dichotomie qui remonte sans doute à Platon et Aristote. Selon le paradigme aristotélicien, la réalité physique est fondamentale et le langage mathématique n'est qu'une approximation utile. Selon le paradigme platonicien, la structure mathématique est la réalité véritable et les observateurs la perçoivent imparfaitement. Autrement dit, les deux paradigmes divergent quant à la perspective la plus fondamentale : celle de l'observateur de la grenouille ou celle des lois physiques de l'oiseau. Le paradigme aristotélicien privilégie la perspective de la grenouille, tandis que le paradigme platonicien privilégie celle de l'oiseau.

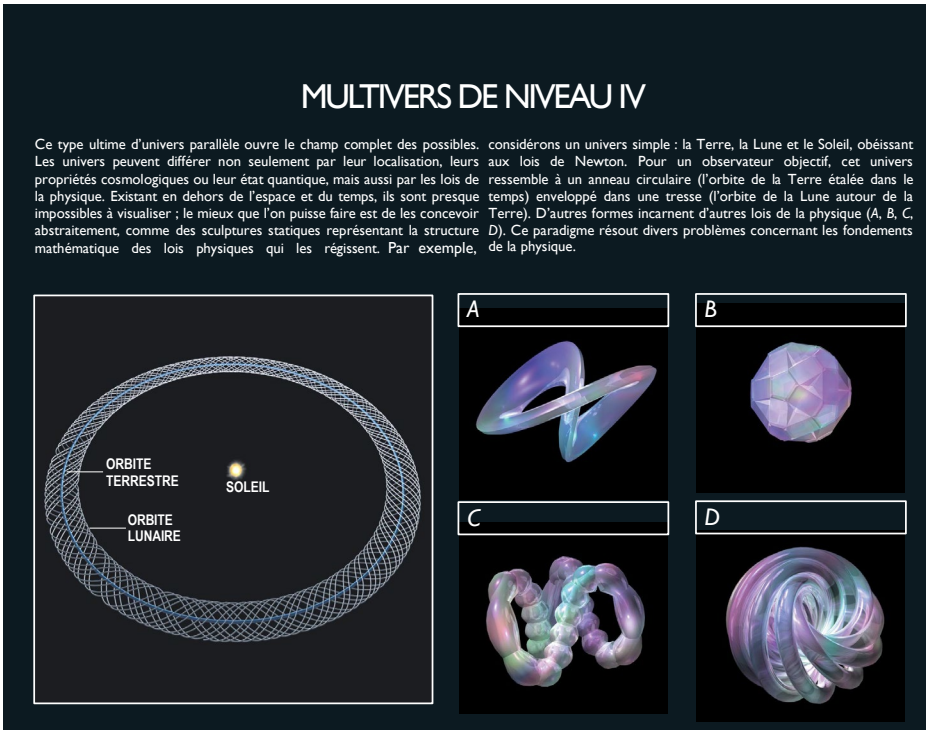
Enfants, bien avant même d'avoir entendu parler de mathématiques, nous avons tous été imprégnés du paradigme aristotélicien. La vision platonicienne est une question de goût. Les physiciens théoriciens modernes ont souvent une approche platonicienne, soupçonnant que les mathématiques décrivent si bien l'univers parce que celui-ci est intrinsèquement mathématique. Dès lors, toute la physique se résume à un problème mathématique : un mathématicien doté d'une intelligence et de ressources illimitées pourrait en principe calculer la perspective de la grenouille — c'est-à-dire calculer quels observateurs conscients d'eux-mêmes l'univers contient, ce qu'ils perçoivent et les langages qu'ils inventent pour communiquer leurs perceptions.

Une structure mathématique est une entité abstraite et immuable existant en dehors de l'espace et du temps. Si l'histoire était un film, cette structure correspondrait non pas à une seule image, mais à la totalité de la bande vidéo. Prenons l'exemple d'un monde composé de particules ponctuelles se déplaçant dans un espace tridimensionnel.

Dans l'espace-temps à quatre dimensions — du point de vue de l'oiseau —, les trajectoires de ces particules ressemblent à un enchevêtrement de spaghettis. Si la grenouille perçoit une particule se déplaçant à vitesse constante, l'oiseau voit un brin de spaghetti cru. Si la grenouille perçoit deux particules en orbite, l'oiseau voit deux brins de spaghettis entrelacés en une double hélice. Pour la grenouille, le monde est décrit par les lois du mouvement et de la gravitation de Newton. Pour l'oiseau, il est décrit par la géométrie des pâtes — une structure mathématique. La grenouille elle-même n'est qu'un épais paquet de pâtes, dont l'entrelacement complexe correspond à un ensemble de particules qui stockent et traitent l'information. Notre univers est bien plus complexe que cet exemple, et les scientifiques ignorent encore à quelle structure mathématique, s'il en existe une, il correspond.

Le paradigme platonicien soulève la question de la nature même de l'univers. Pour un aristotélicien, cette question est dénuée de sens : l'univers est, tout simplement. Mais un platonicien ne peut s'empêcher de se demander pourquoi il n'aurait pas pu en être

autrement. Si l'univers est intrinsèquement mathématique, pourquoi une seule des nombreuses structures mathématiques a-t-elle été choisie pour le décrire ? Une asymétrie fondamentale semble inscrite au cœur même de la réalité.



Pour sortir de cette énigme, j'ai suggéré qu'une symétrie mathématique complète prévaut : toutes les structures mathématiques existent également physiquement. Chaque structure mathématique correspond à un univers parallèle. Les éléments de ce multivers ne résident pas dans le même espace, mais existent en dehors de l'espace et du temps. La plupart de ces univers sont probablement dépourvus d'observateurs. Cette hypothèse peut être considérée comme une forme de platonisme radical, affirmant que les structures mathématiques du royaume des idées de Platon, ou le "mindscape" (paysage de l'esprit) du mathématicien Rudy Rucker de la San Jose State University, existent au sens physique. Elle s'apparente à ce que le cosmologiste John D. Barrow de l'University of Cambridge appelle "π in the sky" (π dans le ciel), à ce que le regretté philosophe de l'Harvard University Robert Nozick appelait le « principe de fécondité », et à ce que le regretté philosophe de Princeton David K. Lewis appelait le « réalisme modal ». Le niveau IV clôt la hiérarchie des multivers, car toute théorie physique fondamentale cohérente peut être formulée comme une certaine structure mathématique.

L'hypothèse du multivers de niveau IV formule des prédictions vérifiables. Comme pour le niveau II, elle repose sur un ensemble (ici, l'ensemble des structures mathématiques) et des effets de sélection. À mesure que les mathématiciens catégorisent les structures mathématiques, ils devraient constater que la structure décrivant notre monde est la plus typique parmi celles compatibles avec nos observations. De même, nos observations futures devraient être les plus typiques

parmi celles compatibles avec nos observations passées, et nos observations passées devraient être les plus typiques parmi celles compatibles avec notre existence.

Définir précisément ce que signifie « typique » est un problème complexe, et cette recherche ne fait que commencer. Cependant, une caractéristique frappante et encourageante des structures mathématiques est que les propriétés de symétrie et d'invariance, responsables de la simplicité et de l'ordre de notre univers, sont généralement typiques, ces propriétés de symétrie sont plus la règle que l'exception. Les structures mathématiques les possèdent souvent par défaut, et il est nécessaire d'ajouter des axiomes complexes pour les faire disparaître.

Que dit Occam ?

Les théories scientifiques des univers parallèles forment donc une hiérarchie à quatre niveaux, où les univers diffèrent progressivement du nôtre. Ils peuvent avoir des conditions initiales différentes (niveau I), des constantes physiques et des particules différentes (niveau II), ou des lois physiques différentes (niveau IV). Paradoxalement, c'est le niveau III qui a suscité le plus de controverses ces dernières décennies, car c'est le seul qui n'introduit aucun type d'univers fondamentalement nouveau.

Niveau I	« Multivers » des univers parallèles dans l'espace au-delà de l'horizon cosmique.
Niveau II	Multivers des bulles post-inflationnistes dans le cadre de l'inflation globale chaotique.
Niveau III	Multivers quantique (Everett) contenant toutes les variantes de l'univers.
Niveau IV	Multivers des structures mathématiques définissant les lois naturelles.

Au cours de la prochaine décennie, l'amélioration considérable des mesures cosmologiques du fond diffus cosmologique et de la distribution de la matière à grande échelle permettra de confirmer ou d'infirmer le niveau I en précisant davantage la courbure et la topologie de l'espace. Ces mesures permettront également d'explorer le niveau II en testant la théorie de l'inflation éternelle chaotique. Les progrès réalisés en astrophysique et en physique des hautes énergies devraient également clarifier la mesure dans laquelle les constantes physiques sont finement ajustées, renforçant ou affaiblissant ainsi les arguments en faveur du niveau II.

Si les efforts actuels pour construire des ordinateurs quantiques aboutissent, ils apporteront des preuves supplémentaires de l'existence du niveau III, puisqu'ils exploiteraient, en substance, le parallélisme du multivers de niveau III pour le calcul parallèle. Les expérimentateurs recherchent également des preuves de violation de l'unitarité, ce qui exclurait le niveau III. Enfin, le succès ou l'échec du grand défi de la physique moderne — l'unification de la relativité générale et de la théorie quantique des champs — influencera les opinions sur le niveau IV. Soit nous trouverons une structure mathématique qui correspond exactement à notre univers, soit nous nous heurterons à une limite de la déraisonnable efficacité des mathématiques et devrons abandonner ce niveau.

Faut-il donc croire aux univers parallèles ? Les principaux arguments contre leur existence sont leur caractère disproportionné et leur étrangeté. Le premier argument est que les théories du multivers sont vulnérables au rasoir d'Occam, car elles postulent l'existence d'autres mondes que nous ne pourrons jamais observer. Pourquoi la nature serait-elle si prodigue et se livrerait-elle à une telle profusion de mondes différents ? Pourtant, cet argument peut être retourné contre nous pour plaider *en faveur* du multivers. Que gaspillerait donc la nature ? Certainement pas l'espace, la masse ou les atomes : le multivers de niveau I, incontestablement, contient déjà une quantité infinie de ces trois éléments, alors qu'importe si la nature en gaspille encore un peu ? Le véritable problème réside ici dans la simplification apparente. Un sceptique s'inquiète de toutes les informations nécessaires pour décrire tous ces mondes invisibles.

Mais un ensemble est souvent bien plus simple que l'un de ses éléments. Ce principe peut être formalisé à l'aide de la notion de contenu informationnel algorithmique. Le contenu informationnel algorithmique d'un nombre correspond, en gros, à la longueur du plus court programme informatique capable de produire ce nombre. Prenons par exemple l'ensemble de tous les entiers. Qu'est-ce qui est le plus simple : l'ensemble entier ou un seul nombre ? Intuitivement, on pourrait penser qu'un nombre isolé est plus simple, mais l'ensemble entier peut être généré par un programme informatique relativement simple, tandis qu'un nombre isolé peut être extrêmement long. Par conséquent, l'ensemble entier est en réalité plus simple.

De même, l'ensemble des solutions des équations d'Einstein est plus simple qu'une solution particulière. Le premier est décrit par quelques équations, tandis que la seconde exige la spécification d'une grande quantité de données initiales sur une hypersurface. On en déduit que la complexité augmente lorsqu'on se concentre sur un élément particulier d'un ensemble, perdant ainsi la symétrie et la simplicité inhérentes à la totalité des éléments considérés.

En ce sens, les multivers de niveau supérieur sont plus simples. Passer de notre univers au multivers de niveau I dispense de spécifier les conditions initiales ; passer au niveau II dispense de spécifier les constantes physiques ; et le multivers de niveau IV dispense de toute spécification. La richesse de la complexité réside entièrement dans la perception subjective des observateurs — le point de vue de la grenouille. Du point de vue de l'oiseau, le multivers ne pourrait guère être plus simple.

Le reproche d'étrangeté relève davantage de l'esthétique que de la science, et n'a de sens que dans une perspective aristotélicienne. Mais à quoi nous attendions-nous ? Face à une question fondamentale sur la nature de la réalité, ne s'attend-on pas à une réponse qui paraisse étrange ? L'évolution nous a dotés d'une intuition pour la physique du quotidien, essentielle à la survie de nos lointains ancêtres ; aussi, lorsque nous nous aventurons au-delà du monde ordinaire, devons-nous nous attendre à ce que cela nous semble bizarre.

Un point commun aux quatre niveaux de multivers est que la théorie la plus simple, et sans doute la plus élégante, implique d'emblée l'existence d'univers parallèles. Pour nier ces univers, il faut complexifier la théorie en y ajoutant des processus non étayés

expérimentalement et des postulats ad hoc : espace fini, effondrement de la fonction d'onde et asymétrie ontologique. Notre choix se résume donc à déterminer ce qui nous paraît le plus superflu et le plus inélégant : la multiplicité des mondes ou la multiplicité des mots. Peut-être nous habituerons-nous peu à peu aux bizarreries de notre cosmos et trouverons-nous que cette étrangeté fait partie de son charme.

POUR ALLER PLUS LOIN

Pourquoi le niveau de fluctuation du CMB est-il de 10^{-5} ? Max Tegmark et Martin Rees, *Astrophysical Journal*, vol. 499, n° 2, p. 526-532, 1er juin 1998. Disponible en ligne **sur arXiv.org/abs/astro-ph/9709058**

La « Théorie du tout » n'est-elle que la théorie de l'ensemble ultime ? Max Tegmark, *Annals of Physics*, vol. 270, n° 1, p. 1-51, 20 novembre 1998. Disponible en ligne sur **arXiv.org/abs/gr-qc/9704009**

Plusieurs mondes en un. Jaume Garriga et Alexander Vilenkin, *Physical Review*, vol. D64, n° 043511, 26 juillet 2001. Disponible en ligne sur **arXiv.org/abs/gr-qc/0102010**

Notre habitat cosmique. Martin Rees. Princeton University Press, 2001.

Inflation, cosmologie quantique et principe anthropique. Andrei Linde, dans *Science et réalité ultime : du quantique au cosmos*, sous la direction de J.D. Barrow, P.C.W. Davies et C.L. Harper, Cambridge University Press, 2003. Disponible en **ligne sur arXiv.org/abs/hep-th/0211048**

Le site Web de l'auteur contient plus d'informations à l'adresse
http://www.hep.upenn.edu/~max/multiverse.html